

# 論文内容要旨

氏名	石田 初美	提出年	平成 26 年
学位論文の題目	Mineralogical and isotopic signatures of the primitive CV3 carbonaceous chondrite RBT 04143: Constraints on formation and early evolution of CV parent asteroids (始原的な CV3 炭素質コンドライト RBT 04143 の鉱物学及び同位体組成に基づく CV 隕石母天体の形成と初期進化過程)		

## 論文目次

## CONTENTS

<b>Abstract</b> .....	i
<b>Contents</b> .....	iii

<b>1. Introduction</b> .....	1
1.1 Chondrites and their components.....	1
1.1.1. Chondrite classification .....	1
1.1.2. Refractory inclusions .....	3
1.1.3. Chondrules .....	4
1.1.4. Matrix.....	5
1.2. CV3 carbonaceous chondrites.....	6
1.2.1. Classification.....	6
1.2.2. Petrology and mineralogy .....	7
1.2.3. Oxygen isotopes.....	8
1.2.4. $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$ systematics: Formation ages of CAIs and chondrules .....	9
<b>2. Samples and analytical procedures</b> .....	12
2.1. Samples .....	12
2.2. Analytical procedures.....	13
2.2.1. Optical and scanning electron microscope analysis .....	13
2.2.2. Electron probe microanalyzer analysis .....	13
2.2.3. Focused ion beam analysis.....	14
2.2.4. Synchrotron radiation X-ray diffraction analysis.....	14

2.2.5. Oxygen isotope analysis.....	15
2.2.6. Al–Mg isotope analysis.....	16
<b>3. Results .....</b>	<b>19</b>
3.1. Petrology and Mineralogy of RBT 04143.....	19
3.1.1. Refractory inclusions .....	23
3.1.2. Chondrules .....	25
3.1.3. Matrix.....	45
3.2. Oxygen isotopic compositions of chondrules in RBT 04143.....	54
3.2.1. Type I chondrules.....	57
3.2.2. Type II chondrules .....	59
3.2.3. Plagioclase-rich chondrules .....	60
3.3. $^{26}\text{Al}$ – $^{26}\text{Mg}$ systematics of chondrules in RBT 04143.....	61
3.3.1. Type I chondrules.....	61
3.3.2. Type II chondrules .....	61
3.3.3. Plagioclase-rich chondrules .....	62
<b>4. Discussion.....</b>	<b>66</b>
4.1. Chondrule formation processes in the early solar nebula.....	66
4.1.1. Oxygen isotope reservoirs in the snow line region .....	66
4.1.2. Chondrule formation age of RBT 04143.....	71
4.1.3. Relationship between $\Delta^{17}\text{O}$ values and relative $^{26}\text{Al}$ ages of chondrules .....	73
4.2. The early evolution of RBT 04143 parent asteroids .....	75
4.2.1. Relationship between relative $^{26}\text{Al}$ ages and Mg# of chondrules .....	75
4.2.2. Relationship between $^{26}\text{Al}$ ages and Si-excess in chondrule plagioclase.....	76
4.2.3. Thermal metamorphism of RBT 04143 parent asteroids .....	78
4.2.4. Brecciation processes on the RBT 04143 parent asteroid .....	87
<b>5. Conclusions .....</b>	<b>89</b>
<b>Acknowledgement .....</b>	<b>91</b>
<b>References .....</b>	<b>92</b>

## Abstract

Carbonaceous chondrites are one of the most primitive extraterrestrial materials and are the best sample to study the formation and early evolution of the early solar system. CV3 carbonaceous chondrites, one of the carbonaceous chondrite groups, escaped from intensive alteration but experienced low but variable degrees of secondary alteration, which suggests that their parent asteroids formed in heterogeneous environments in regions of protoplanetary disk with different water/rock ratios such as “snow line”. It is very important to understand the physicochemical conditions of snow line region because it is a boundary of the H<sub>2</sub>O state (vapor or solid), and H<sub>2</sub>O mostly determined the oxidation state of the early solar nebula.

CV3 carbonaceous chondrites are classified into three subtypes: oxidized Allende-like (CV3<sub>oxA</sub>), oxidized Bali-like (CV3<sub>oxB</sub>), and reduced (CV3<sub>red</sub>). These sub types represent the differences of the degrees of aqueous alteration and thermal metamorphism. CV3<sub>red</sub> chondrites are the most primitive meteorites in the CV3 carbonaceous chondrites, because it has undergone the least degrees of aqueous alteration and thermal metamorphism. For this reason, in order to understand the primitive dust characteristics and nebula conditions in protoplanetary disk in the CV-chondrite forming regions, I have carried out a detailed investigation of mineralogy, petrology, chemical and isotopic compositions of the pristine CV3<sub>red</sub> carbonaceous chondrite RBT 04143.

Based on detailed mineralogical and petrological observations of RBT 04143, there is almost no evidence of intensive secondary alteration on their parent asteroid. RBT 04143 consists of clasts of variable sizes and lithologies indicating prevailing brecciation on their parent asteroid. The oxygen isotope ratios of multiple silicate phases in chondrules show identical compositions within analytical uncertainties, suggesting undetectable isotope fractionation between silicates in chondrules. Though there are some exception, the average  $\Delta^{17}\text{O}$  values of individual chondrules show bimodal distribution, which is negatively correlated with the average Mg# of chondrules like other carbonaceous chondrite chondrules;  $\Delta^{17}\text{O} \sim -5.9\text{\textperthousand}$  for chondrules with Mg# of 99 and  $\Delta^{17}\text{O} \sim -2.4\text{\textperthousand}$  for chondrules with Mg# of 86. It indicates that there are two types of oxygen isotope reservoirs with different redox states for chondrules in RBT 04143. The higher  $\Delta^{17}\text{O}$  values of type II chondrules are accounted for by an addition of water ice with high  $\Delta^{17}\text{O}$  as an oxidant. Inferred initial  $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  ratios of some chondrules in RBT 04143 are indistinguishable within analytical uncertainty and consistent with those of other primitive carbonaceous chondrites (e.g., Acfer 094). The results of  $^{26}\text{Al}-^{26}\text{Mg}$  systematics in conjunction with the oxygen isotope data suggest contemporaneous formation of carbonaceous chondrite chondrules from regionally heterogeneous oxygen isotope reservoirs, which may have been located in the vicinity of the snow line

Besides unaltered chondrules with resolvable  $^{26}\text{Mg}$  excess and homogeneous Mg#, there are some chondrules in RBT 04143 that experienced secondary thermal processing in the parent asteroid. The altered chondrules have no/small resolvable radiogenic  $^{26}\text{Mg}^*$ , show no resolvable silica-excess in plagioclase, and contain olivine with the Mg# slightly lower than those of low-Ca pyroxene within the same chondrule. Thus, there are two types of textural units (altered and unaltered) in RBT 04143, which were mixed by the impact-induced gardening on the parent asteroid. In order to investigate the early evolution of RBT 04143 parent asteroid, the cooling rate during thermal metamorphism is estimated based on the observed and the

calculated Fe-Mg diffusion profiles of olivine in an altered chondrule. The obtained cooling rate (10 [°C/Myr]) can be converted as a depth of approximately 14km using a thermal model of the RBT 04143 parent asteroid that formed with 30 km in radius at 2.7 Myr after CAI formation. I infer that RBT 04143 formed by brecciation process that mixed up the unaltered surface material with the thermally-altered material located at deeper layer in the parent asteroid.

### 論文審査の結果の要旨

石田初美提出の論文は CV 炭素質コンドライトの還元サブタイプに属する RBT 04143 隕石に対して、岩石鉱物学的、および同位体宇宙化学的研究を行うことで、RBT 04143 隕石が形成された原始惑星系円盤の雪線領域における微小天体の形成進化過程を明らかにしたものである。実験の方法と結果は次のようにまとめられる。光学顕微鏡、電子顕微鏡を用いて RBT 04143 隕石に含まれる球状物質コンドリュールの構成鉱物とその化学組成を求め、二次イオン質量分析計を用いてコンドリュールの構成鉱物の酸素同位体比測定、および短寿命核  $^{26}\text{Al}$  による形成年代推定を行った。

第一章では、CV コンドライト隕石に関する先行研究について、特に高温形成物質であるコンドリュールや CAI の岩石鉱物学的研究および同位体を用いた研究についてまとめている。第二章では、使用した隕石試料 RBT 04143 隕石のサンプル処理法、および分析方法について説明している。第三章では、RBT 04143 隕石の全体的な岩石鉱物学的特徴を示し、また、同位体分析を行ったコンドリュール 13 試料の酸素同位体比の測定結果を示している。 $\text{Mg}$  に非常に富む橄欖石や輝石を含むタイプ I コンドリュールは  $^{16}\text{O}$  に富む傾向 ( $\Delta^{17}\text{O} \sim -5.9\text{\textperthousand}$ ) を示し、一方  $\text{Fe}$  を少し含むタイプ II コンドリュールは  $^{16}\text{O}$  に乏しい傾向 ( $\Delta^{17}\text{O} \sim -2.4\text{\textperthousand}$ ) を示すことがわかった。酸素分析を行ったコンドリュールのうち 6 試料については短寿命核種  $^{26}\text{Al}$  による形成年代推定を行い、3 試料は太陽系最古物質である CAI 形成から約 2.3~3.6 百万年後に形成されたことがわかった。一方、残りの 3 試料については、 $^{26}\text{Al}$  が崩壊してできる  $^{26}\text{Mg}$  の優位な過剰が検出できず、形成年代が求まらなかった。第四章では、CV タイプの炭素質隕石 RBT 04143 に含まれるコンドリュールの形成環境、およびコンドリュールが隕石母天体に集積後に受けた天体内部における熱変成を定量的に論じている。タイプ I およびタイプ II コンドリュールの形成年代に差異がないことから、それぞれのコンドリュールは CAI が形成したから数百万年が経過した原始惑星系円盤の異なる 2 つの領域で形成された可能性が高いことを示した。タイプ II コンドリュールは  $^{16}\text{O}$  に乏しい傾向を示すことから、このタイプのコンドリュールの形成領域には  $^{16}\text{O}$  に乏しい氷が共存していたことを示唆した。一方、形成年代が得られなかつたコンドリュール試料を構成する橄欖石は、天体内部の熱変成時に形成された Fe-Mg 化学ゾーニングを示すことがわかった。この化学ゾーニングを解析することで、このコンドリュールが熱変成を受けた際の天体内部の位置を推定した。天体内部で熱変成を受けたコンドリュールは、その後の衝突現象で熱変成の影響が少ない天体表層物質と混合し、角礫岩を形成したと推定した。そのため RBT 04143 隕石は、天体表層物質と内部物質の混合であること、さらに前者から天体集積前のコンドリュール形成の情報が引き出せ、後者からは天体形成後の初期熱変成の情報を引き出せることを示した。

以上の研究成果は、石田初美が自立して研究活動を行うのに必要な高度な研究能力と学識を有していることを示している。したがって、石田初美提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。